

**Jiří PROTIVÍNSKÝ<sup>1</sup>, Martin KREJSA<sup>2</sup>**

**VYUŽITÍ PRINCIPU DISIPACE PŘI SEISMICKÉM NÁVRHU OCELOVÉ KONSTRUKCE  
PARNÍHO KOTLE**

**MAKING USE OF THE PRINCIPLE OF ENERGY DISSIPATION IN THE SEISMIC DESIGN OF  
A STEEL STRUCTURE OF A STEAM BOILER**

**Abstrakt**

Při návrhu nosné konstrukce vystavené účinkům zemětřesení je možné analyzovat konstrukci pomocí lineárně jako lineárně pružnou nebo jako konstrukci s plastickými klouby, které se rozvinou během seismické situace. Oba způsoby analýzy konstrukcí jsou definovány v evropských normách navrhování, ovšem druhý způsob vycházející z principu přeměny seismické energie v teplo v plastických kloubech je z důvodu náročnosti průkazu bezpečnosti, využíván minimálně. Aplikace principů toho přístupu je prezentována v příspěvku na příkladu konstrukce parního elektrárenského kotle.

**Klíčová slova**

Seismicita, zemětřesení, disipace energie, disipativní zóna., duktilita, součinitel duktility.

**Abstract**

For structural design of steel structures under seismic action there are two possible approaches of global analysis. In global analysis we can consider the structure to behave in linear elastic way or in post-elastic way with developing of plastic hinges during seismic situation. The second method is based on principle of seismic energy transformation into thermal energy. Both design methods are defined in Eurocodes but the post-elastic way is only rarely used because of design complexity. Application of this design method is presented in the entry on example of steam power plant boiler structure.

**Keywords**

Seismicity, earthquake, energy dissipation, critical zones, ductility, behaviour factor.

## **1 ÚVOD**

Navrhování konstrukcí vystavených seismickým účinkům s sebou nese řadu aspektů, které je potřeba při návrhu zohlednit. Především je potřeba zajistit předepsanou míru spolehlivosti konstrukce po celou dobu její plánované životnosti. Je potřeba vzít v úvahu, že jakkoli precizně provedená matematická globální analýza konstrukce je zatížena určitou mírou nejistoty vyplývající z nepřesného odhadu velikosti a typu působícího zemětřesení, a z nejistot vyplývajících ze zjednodušení reálné konstrukce na dynamický model. Také je potřeba mít na paměti, že při návrhu dynamicky namáhaných konstrukcí nemusí zesílení konstrukce vést k bezpečnějšímu návrhu.

---

<sup>1</sup> Ing. Jiří Protivínský, Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 777 995 914, e-mail: jiri.protivinsky@vsb.cz.

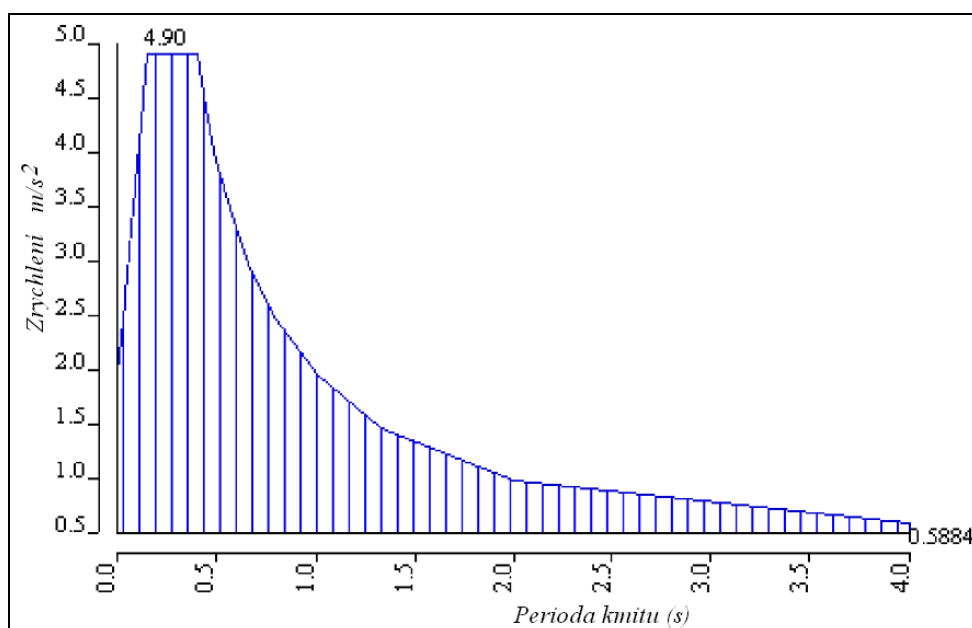
<sup>2</sup> Doc. Ing. Martin Krejsa, Ph.D., Katedra konstrukcí, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 303, e-mail: martin.krejsa@vsb.cz.

Analýza konstrukce dimenzované na účinky zemětřesení může být provedena jako lineárně pružná statická analýza zahrnující účinky zemětřesení buď ve formě statických sil nebo ve formě harmonického buzení v podloží. Druhou možností je dimenzovat konstrukci, která na seismické buzení odpovídá nepružně. Tato možnost je nazývána disipativní koncepcí, jelikož předpokládá, že energie zemětřesení působící na konstrukci může být v takto navržené konstrukci disipována v plastických kloubech, neboli přeměněna v teplo během plastifikace projektovaných oblastí (dále „disipativních zón“). Návrh disipativních konstrukcí ovšem k výše zmiňovaným nejistotám přidává další vyplývající ze statistického rozptylu hodnoty meze kluzu v použitých prvcích a změně dynamického chování nelineární konstrukce. Aplikace této koncepce bude v tomto příspěvku prezentována na návrhu disipativní konstrukce elektrárenského kotle. Dále zde budou prezentovány výsledky studie hospodárnosti disipativní koncepce oproti klasickému elastickému návrhu a nastíněny problematická místa této metody.

## 2 TEORETICKÉ POZADÍ ŘEŠENÍ SEISMICKÉHO NÁVRHU KONSTRUKCÍ

Zemská kůra je tvořena zemskými deskami, které se vůči sobě pohybují. Jednotlivé desky si vzájemně brání v pohybu silami vyvolanými třením v ploše vzájemného kontaktu. Seismický impuls vzniká náhlým uvolněním naakumulované energie vnitřních sil na okraji jedné ze zemských desek. Tato energie se následně šíří zemským masivem formou různých typů vln [1]. Seismické zatížení konstrukcí pak uvažujeme jako ustálené harmonické buzení v podporách konstrukce. Seismické zatížení pro konkrétní stavbu je dáno hodnotou referenčního zrychlení podloží, které je pro danou lokalitu stanoveno v seismických mapách a odpovídá velikosti zemětřesení s dobou návratu 475 let.

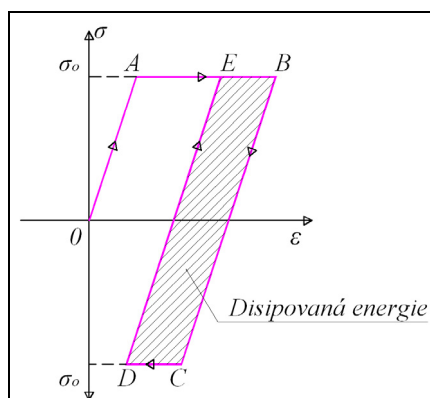
V dnešní době je nejrozšířenějším způsobem analýzy konstrukcí zatížených seismicitou metoda pružného spektra odezvy podloží pro dané místo stavby s harmonickou analýzou konstrukce rozvojem do vlastních tvarů. Tato metoda převádí referenční zrychlení podloží na spektrum několika zrychlení působících s periodou kmitů blízkí se nule až po periodu kmitu rovnu 4 sekundy. Tato metoda umožňuje zohlednit vliv tlumení vnitřním útlumem konstrukce a kombinovat účinky více vlastních tvarů kmitání.



Obr. 1: Návrhové spektrum pružné odezvy podloží použité pro analýzu vyšetřované konstrukce – nedisipativní varianty

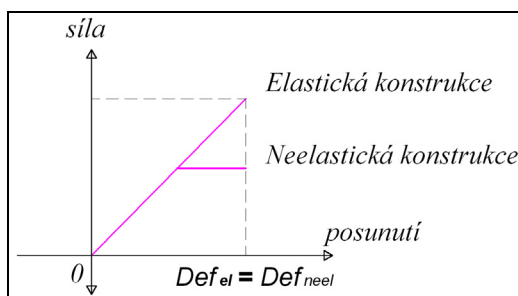
### 3 TEORETICKÉ POZADÍ DISIPATIVNÍHO NÁVRHU KONSTRUKCÍ

Disipativní návrh vychází z aplikací zásad teorie plasticity, principů druhého termodynamického zákona a teoretických prací I. Prigogina [2] a H. Zieglera [3]. Překročením meze kluzu materiálu ve vybraných detailech dochází k nevratnému termodynamickému jevu, energie vnějších sil se mění v teplo, entropie systému roste a v souladu s dynamickým materiálovým modelem dochází k změnám struktury materiálu.



Obr. 2: Pracovní diagram oceli v disipativních zónách konstrukce[4]

N. M. Newmark [4] prokázal, že konstrukce, která zůstane elastická má přibližně stejné výsledné deformace jako konstrukce u níž došlo k rozvoji plastických oblastí. Z tohoto poznatku vyplývá, že disipativní konstrukce je možno navrhovat pomocí lineárně pružné analýzy.



Obr. 3: Princip stejných deformací [4]

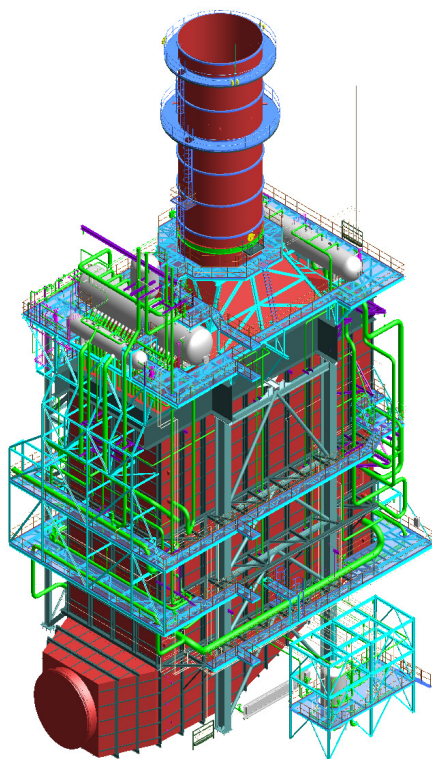
Potenciál konstrukce disipovat energii vyjadřuje součinitel duktility. Jinými slovy součinitel duktility kvantifikuje míru rezerv konstrukce jako celku v nepružné oblasti. Tento součinitel stanovuje projektant konstrukce podle způsobu předpokládaného rozptylu energie v disipativních zónách a podle míry statické neurčitosti konstrukce. Hodnota součinitele duktility může dosahovat v souladu s EN normami [6] hodnot od jedné do šesti i více. Tímto číslem jsou děleny silové účinky zemětřesení na prvky konstrukce i účinky konstrukce na spodní stavbu, jedná se tedy o součinitel, který výsledný návrh ovlivní zásadním způsobem.

Podstatou návrhu disipativní konstrukce je rozmístění disipativních zón v konstrukci tak, aby k rozvoji plastických deformací ve všech zónách docházelo rovnoměrně. Disipativní zóny mají být rozmístěny rovnoměrně po výšce i půdorysu konstrukce tak, aby jejich plastifikací nedošlo ke změně pravidelnosti či symetrie konstrukce. Mohou být projektovány do prvků příčlů, ztužidel případně do přípoju těchto prvků k ostatním konstrukcím.

#### 4 POPIS VYŠETŘOVANÉHO TYPU KONSTRUKCE

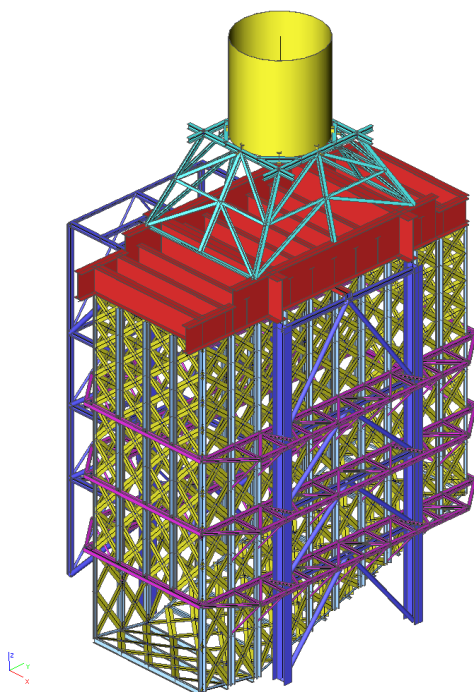
Aplikace disipativní koncepce navrhování bude prezentována na příkladu nosné ocelové konstrukce elektrárenského vertikálního kotle na odpadní teplo. Základním pracovním úkonem elektrárenského kotle je přeměna vody v páru pro potřeby parní turbíny.

Vertikální kotle jsou tvořeny pláštěm kotle, který slouží k vedení spalín od spalovací turbíny ke komínu. Uvnitř pláště tedy v prostoru, kde proudí spaliny, jsou vedeny potrubní systémy v nichž dochází k ohřívání vody, jejímu odpaření a přehřívání výstupní páry. Spalinovod i potrubní systém jsou zavěšeny na nosnou konstrukci stropu kotle a dilatují směrem dolů. Plášť kotle je k nosné konstrukci uchycen přes kluzné svislé vedení, které zajišťuje polohu kotle a přenos vodorovných sil do základů.

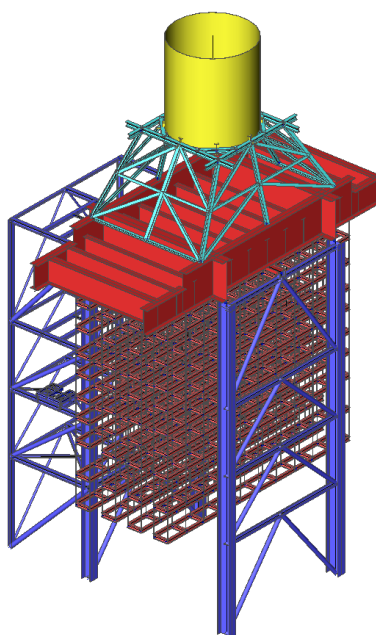


Obr. 4: 3D náhled na model vertikálního kotle v programu PDMS (projekt Krasnodar, Rusko)

Nosná konstrukce vertikálního kotle je tvořena prostorovým rámem na jedné straně kotle, rovinným rámem na druhé straně kotle a stropními nosníky. Stropní nosníky zajišťují polohu rovinného rámu a je na nich zavěšen celý kotel, tedy jeho plášť i veškeré potrubní systémy. Převážná část statického zatížení je přenášena do sloupů stropními nosníky a působí v hlavě sloupů. Z hlediska dynamického působení, jsou hmoty v konstrukci soustředěny především v potrubních systémech. Potrubní svazky (dále „moduly“) jsou zavěšeny jeden do druhého a vše je zavěšeno přes nejhornější modul do stropních nosníků. Kluzné svislé vedení modulů je řešeno v několika úrovních ovšem ne v úrovni každého modulu. Dynamické vyšetření chování celého potrubního systému bude předmětem další práce. Pro potřeby této studie byly hmoty konzervativně rozděleny do míst vedení.



Obr. 5: 3D náhled na statický model vertikálního kotle v programu SCIA (projekt Krasnodar, Rusko)



Obr. 6: 3D náhled na statický model vertikálního kotle v programu SCIA – simulace zavěšení potrubních svazků (projekt Krasnodar, Rusko)

## 5 NÁVRH DISIPATIVNÍ KONSTRUKCE VERTIKÁLNÍHO KOTLE

Přenos vodorovných sil v konstrukcích vertikálních kotlů je zajištěn svislým zavětrováním sloupů ve tvaru „A“ a ohybovou tuhostí sloupů. Disipativní zóny u tohoto typu konstrukce je možno řešit v tlačенých diagonálách ztužidel, příčlích nebo v seismických člancích excentrického ztužení. Pro další práci byla zvolena varianta se svislými seismickými články. Jejich výhodou je, že mohou být po seismické události snadno demontovány a nahrazeny novými prvky.

Pro stanovení hodnoty součinitele duktility bylo potřeba zařadit konstrukci do odpovídající třídy duktility podle EN 1998[6]. Volba třídy duktility je odvislá od tříd průřezů požitych pro primární seismické prvky, jak je klasifikuje EN 1993-1-1[7]. Dimenze profilů stanovená na konstrukcích kotlů na účinky statických zatížení bývají obvykle třídy 1 a 2, proto byla konstrukce zařazena do třídy duktility M s maximální hodnotou součinitele duktility 4. Konstrukce vertikálního kotle zpravidla nesplňuje kriteria pravidelnosti definovaná v EN 1998[6], proto není vhodné používat maximálních dovolených hodnot uvedených v tabulce 1. Hodnota součinitele duktility byla pro disipativní návrh konstrukce vertikálního kotle stanovena na hodnotu 3,2.

Tab. 1: Omezení tříd průřezu podle třídy duktility konstrukce

Třída duktility	Koncepce navrhování	Maximální třída průřezu	Maximální součinitel duktility
L - nízká	nedisipativní	4	1,5
M - střední	disipativní	3	2
	disipativní	2	4
H - vysoká	disipativní	1	> 4

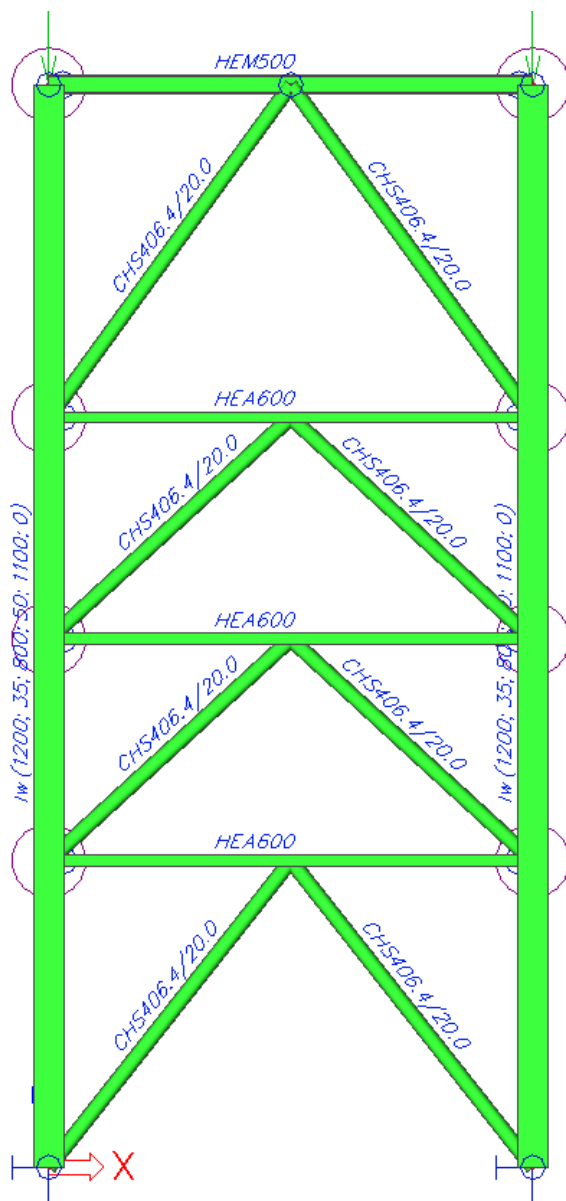
## 6 POROVNÁNÍ NÁVRHU DISIPATIVNÍ A NEDISIPATIVNÍ KONSTRUKCE

Pro potřeby této studie byla vyšetřována část konstrukce vertikálního kotle realizovaného firmou Babcock Borsig Steinmüller CZ s.r.o. (dále „BBS“) v roce 2011 v lokalitě Krasnodar, Rusko. Konstrukce byla navržena jako nedisipativní na účinky seismicity definované referenčním zrychlením podloží 0,2g zvětšené součinitelem významu konstrukce na 0,3g. Z prostorové konstrukce, která je vyobrazena na obrázku 5 a 6 byla izolována 2D konstrukce nesoucí polovinu stropu a tedy polovinu rozhodujícího zatížení kotle. Zjednodušení kompletního řešení na ohraničenou dílčí část vedlo ke snížení pracnosti a zvýšilo vypovídající hodnotu výsledného porovnání hmotností obou variant. Náhodné účinky krutu konstrukce jako celku budou zohledněny zvětšením momentových vnitřních sil v souladu s EN 1998[6]. Součinitel disipace nedisipativní konstrukce byl stanoven v souladu s EN 1998 [6] na 1,5.

Návrh vyšetřované konstrukce disipativní koncepcí si vyžádal několik koncepčních úprav statického modelu. V nedisipativní variantě byly všechny přípoje příčlích ke sloupům modelovány jako kloubové se zanedbáním rotačních tuhostí přípojí. Při disipativním návrhu bylo nutné zvýšit statickou neurčitost konstrukce, proto byly kloubové přípoje příčlích a rámců nahrazeny momentově tuhými spojeními. Další zásadní změnou bylo vložení seismických článků mezi styčníky vertikálního zavětrování a příčlích. S ohledem na praktické aspekty snadné demontáže byly zvoleny krátké svislé seismické články různých délek. Délka byla volena tak, aby byl splněn požadavek rovnoměrného přetížení všech disipativních zón a maximální faktor přetížení nejvíce namáhaného článku od nejméně namáhaného článku nelišil o více jak 25%.

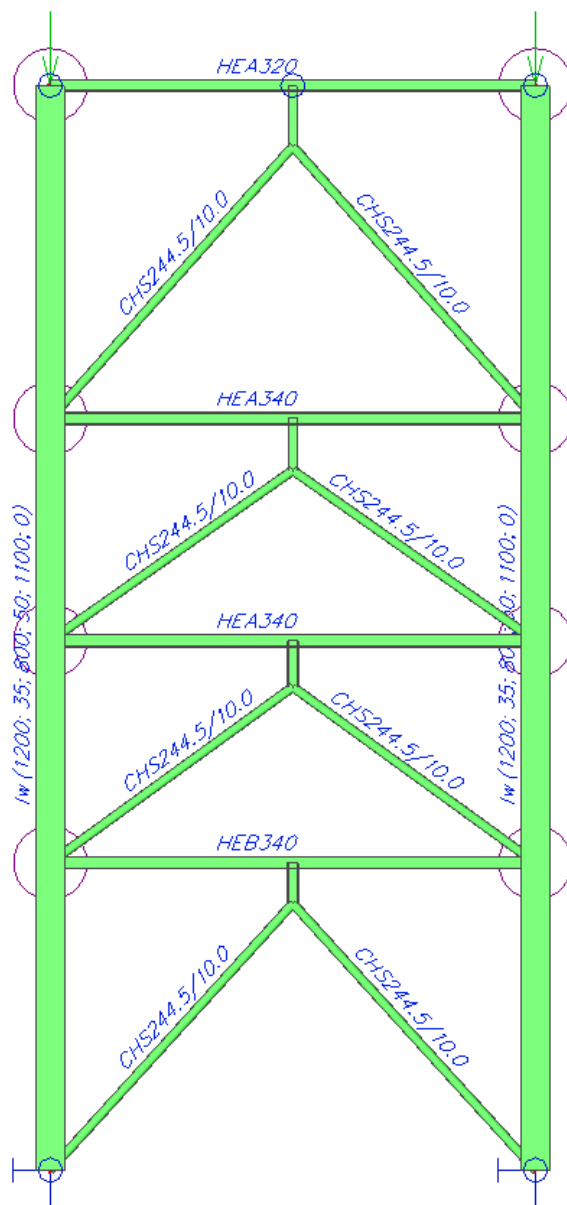
Dynamická analýza konstrukce v obou variantách byla provedena v programu Scia Engineer 2011.1 pro prvních deset vlastních frekvencí konstrukce. Pro výpočet vlastních tvarů byla zvolena metoda iterace podprostoru. Účinky jednotlivých vlastních tvarů byly kombinovány metodou úplné kvadratické kombinace s uvážením součinitele logaritmického útlumu 0,05 zadaného pro celé

spektrum vlastních frekvencí. Změna tlumících charakteristik v plastických kloubech disipativní konstrukce byla zanedbána a její přesné určení bude předmětem další práce. Vzhledem k tomu, že suma hmot účinných v jednotlivých vlastních tvarech přesáhla v obou vyšetřovaných směrech 99%, byly do výpočtu uváženy pouze participující hmoty.



Obr. 7: 3D náhled na statický model výseku konstrukce vertikálního kotle v programu SCIA – nedisipativní návrh (symbolicky znázorněné rozmístění působících zatížení a hmot)

Rozhodující vlastní frekvence nedisipativní konstrukce byla 1,074Hz pro směr X a 0,637Hz pro směr Y. Uvedeným frekvencím odpovídal jednoduchý vlastní tvar s jednou vlnou.



Obr. 8: 3D náhled na statický model výseku konstrukce vertikálního kotle v programu SCIA – disipativní návrh (symbolicky znázorněné rozmístění působících zatížení a hmot)

Rozhodující vlastní frekvence disipativní konstrukce byla 0,299Hz pro směr X a 0,639Hz pro směr Y. Uvedeným frekvencím odpovídal jednoduchý vlastní tvar s jednou vlnou.

Návrh dimenzí disipativních článků byl proveden na účinky zemětřesení redukované podělením součinitelem duktility. Přípoje článků, příče a sloupy byly ověřeny kapacitním návrhem. Bylo potřeba prokázat, že prvky připojené na články bezpečně odolají silám rovným plastické únosnosti článků zvětšeným součiniteli vyjadřujícími statistický rozptyl meze kluzu materiálu. Dalším ověřením potom bylo prokázání, že všechny prvky mimo disipativní zóny bezpečně přenesou silové účinky vyplývající ze speciální kombinace:



$$R_{dJ} \geq \gamma * \frac{R_{dl}}{E_{dl}} * E_{dJ} + S_{dJ,G} \quad (1)$$

kde:

$R_{dJ}$  – je únosnost prvku mimo disipativní zóny (N, M, V)

$\gamma$  – bezpečnostní součinitel

$R_{dl}$  – únosnost seismického článku (N, M, V)

$E_{dl}$  – zatěžovací účinek v seismickém článku od seismického zatížení (N, M, V)

$E_{dJ}$  – zatěžovací účinek v prvcích mimo disipativní zóny od seismického zatížení (N, M, V)

$S_{dJ,G}$  – zatěžovací účinky od neseismických zatěžovacích stavů, které se vyskytují v seismické kombinaci v prvcích mimo disipativní zóny (N, M, V)

## 7 POROVNÁNÍ HOSPODÁRNOSTI DISIPATIVNÍ A NEDISIPATIVNÍ KONSTRUKCE

Rozdíl v dimenzích na posuzovaných variantách se projevil především ve výztužném systému konstrukce a v dimenzích rámových příčlích. Podíl hmotností jednotlivých typů konstrukce na celkové konstrukci vertikálního kotle a rozdíl hmotnostních podílů shrnují následující tabulky.

Tab. 2: Hmotnosti konstrukcí stanovené pro modelované varianty - hodnoty uváděné v kg

Druh konstrukce	Sloupy	Příčle	Články	Zavětrování	Celkem
Nedisipativní konstrukce	54511	10544	0	15058	80113
Disipativní konstrukce	54511	5789	593	4127	65020

Tab. 3: Procentuelní rozdělení hmotností konstrukcí rozpočítané na celou konstrukci vertikálního kotle projektu Krasnodar – hodnoty uváděné v procentech

Druh konstrukce	Sloupy	Příčle	Články	Zavětrování	Strop kotle	Celkem
Nedisipativní konstrukce	31,3	6,4	0	6,1	53,4	100
Disipativní konstrukce	31,3	3,5 - 6,4	1	1,7 - 4	53,4	93,7–98,9

Tab. 4: Reakce konstrukce na spodní stavbu - hodnoty uváděné v kN

Druh konstrukce	$R_x$	$R_y$	$R_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
Nedisipativní konstrukce	3449	715	24915	0	0	0
Disipativní konstrukce	1545	345	14078	0	0	0

## 8 ZÁVĚR

Návrh disipativních konstrukcí vede k návrhu konstrukcí hospodárnějších. V případě nosné konstrukce vertikálního parního kotle na odpadní teplo vede použití disipativní koncepce navrhování vede k úspoře návrhu v řádu procent. Úsporu je možné očekávat v návrhu dimenzí profilů zavětrování a příčlů. Velké úspory je také možno dosáhnout při návrhu základů, jelikož účinky konstrukce na spodní stavbu jsou při disipativním návrhu nepřímo úměrně menší než hodnoty dosažené při nedisipativním návrhu a to v poměru použitých součinitelů duktility.

## PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl realizován za finančního přispění ze státních prostředků prostřednictvím Studentské grantové soutěže. Registrační číslo projektu je SP2012/186.

## LITERATURA

- [1] BULLEN, K & BOLT, B. *An introduction to the theory of seismology*. 4th Ed. New York: Cambridge University Press, 1985, XVII, 499 pp. ISBN 05-212-8389-2
- [2] NICOLIS, G. & PRIGOGINE, I. *Self-organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*. 1st. Ed. California, USA: John Wiley & Sons, 1977. 512 pp. ISBN 0-471-024-015.
- [3] GURTIN, M. & FRIED, E. & ANAND, L. *The mechanics and thermodynamics of continua*. 1st. Ed. New York: Cambridge University Press, 2010, XXI, 694 pp. ISBN 05-214-0598-X.
- [4] NEWMARK, N & HALL, W. *Earthquake spectra and design (Engineering monographs on earthquake criteria, structural design, and strong motion records)*. California.: Earthquake Engineering Research Institute, 1982, 103 pp. ISBN 09-431-9822-4.
- [5] TEPLÝ, B. *Pružnost a plasticita*. 2. vyd. Brno: CERM, 2000, 199 pp. ISBN 80-214-1622-X.
- [6] ELGHAZOULI, A. *Seismic design of buildings to Eurocode 8*. New York: Spon Press, 2009, XVI, 318 pp. ISBN 978-020-3888-940.
- [7] SILVA, L. & SIMOES, R. *Design of steel structures: Eurocode 3: design of steel structures : part 1-1 - general rules and rules for buildings*. Brussels: ECCS, 2010, XVI, 438 pp. ISBN 978-92-9147-098-3.

## Oponentní posudek vypracoval:

Prof. Ing. Juraj Králik, PhD., Katedra stavební mechaniky, Stavební fakulta, STU v Bratislave.

Doc. Ing. Stanislav Pospíšil, Ph.D., Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i., Praha.